

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
27 octobre 2005 (27.10.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/101058 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G01V 1/38

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2005/000587

(22) Date de dépôt international : 11 mars 2005 (11.03.2005)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0402656 15 mars 2004 (15.03.2004) FR

(71) Déposant et

(72) Inventeur : DEMOULIN, Xavier [FR/FR]; 21, rue Ed.
Manet, F-56260 Larmor-Plage (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : SARZEAUD,
Olivier [FR/FR]; La Chaussée, F-44390 Petit-Mars (FR).

(74) Mandataires : BEAUFILS, Yves etc.; Novagraaf Tech-
nologies, Cabinet Ballot, 4, rue Général Hoche, F-56100
Lorient (FR).

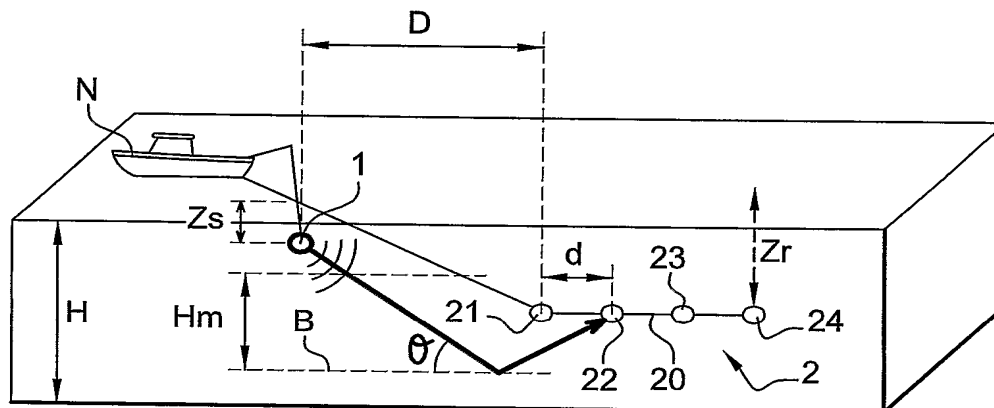
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,
PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM,
ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM),
européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR GEOTHECHNICALLY CHARACTERISING AN UNDERWATER FLOOR BY MEANS OF A
BROAD-BAND AND MULTIPLE FLATNESS ACOUSTIC WAVE

(54) Titre : PROCEDE DE CARACTERISATION GEOTECHNIQUE D'UN FOND SUBAQUATIQUE, UTILISANT UNE ONDE
ACOUSTIQUE A LARGE BANDE ET A RASANCE MULTIPLE



(57) Abstract: The invention relates to a method for geotechnically characterising an underwater floor (B) involving at least one phase, wherein an acoustic wave is emitted by a source (1) and detected by a receiver streamer (2) and an analysis phase, wherein signals produced by receivers (21-24) are used for determining the physical parameters of a strata forming the floor (B). The inventive method uses the angle and frequency-dependence of the acoustic wave reflection coefficient on the interface formed by each stratum.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de caractérisation géotechnique d'un fond sub-aquatique (B) comprenant au moins une phase d'investigation dans laquelle une onde acoustique est émise par une source (1) et détectée par une flûte (2) de récepteurs, et une phase d'analyse dans laquelle les signaux produits par les récepteurs (21 à 24) sont exploités pour déterminer des paramètres physiques des strates constituant le fond (B). Le procédé de l'invention exploite la dépendance angulaire et fréquentielle du coefficient de réflexion de l'onde acoustique sur l'interface que forme chacune des strates.

WO 2005/101058 A1



SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv) pour US seulement

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

**PROCEDE DE CARACTERISATION GEOTECHNIQUE D'UN FOND
SUBAQUATIQUE, UTILISANT UNE ONDE ACOUSTIQUE A LARGE BANDE
ET A RASANCE MULTIPLE.**

5 L'invention concerne, de façon générale, les techniques de prospection par excitation sonique.

Plus précisément, l'invention concerne un procédé de caractérisation géotechnique d'un fond sub-aquatique, tel
10 qu'un fond sous-marin, recouvert d'une nappe d'eau de hauteur totale déterminée, et comprenant une pluralité de strates formant entre elles des interfaces de séparation, présentant chacune des paramètres physiques propres et s'étendant à des profondeurs diverses en dessous d'une
15 première strate qui forme une interface de séparation avec l'eau, ce procédé comprenant au moins une phase d'investigation, une phase de pré-traitement et une phase d'analyse, la phase d'investigation incluant elle-même une opération d'excitation acoustique, mise en œuvre en
20 émettant au moins vers le fond, depuis une source acoustique immergée, une onde acoustique incidente de signature fréquentielle connue, une opération d'acquisition mise en œuvre en produisant, au moyen d'une flûte d'au moins quatre récepteurs immergés, des signaux
25 de mesure respectifs résultant d'une détection d'ondes acoustiques respectives réfléchies par le fond, et une opération de relevé de données géométriques, la flûte étant au moins approximativement alignée sur la source et distante du fond, les récepteurs étant espacés les uns
30 des autres, et l'onde incidente étant émise dans chaque fenêtre d'une succession de fenêtres temporelles d'émission disjointes, et présentant une variation

temporelle de fréquence à l'intérieur de chaque fenêtre d'émission.

Un procédé de ce type est par exemple décrit dans le
5 brevet US 6 151 556.

D'autres procédés sont également connus de l'homme du métier, et notamment ceux que décrivent les documents de brevets EP - 0 215 703 et EP - 0 553 053.

10

De façon plus générale, les systèmes acoustiques connus pour l'investigation des fonds sont soit des systèmes d'imagerie, soit des systèmes sismiques.

15 Les systèmes d'imagerie classiques utilisent des ondes acoustiques de fréquences élevées, typiquement supérieures à 30kHz, émises vers le fond et permettant d'établir une image de la surface du fond indépendamment du sous-sol en présence en se basant sur le mécanisme de
20 rétro-diffusion.

Les systèmes sismiques usuels du type précédemment défini utilisent, en tant qu'émetteur, un boomer produisant un signal acoustique à très basse fréquence et présentant
25 donc l'avantage de pénétrer profondément dans le sous-sol.

Le signal issu des multiples réflexions et recueilli sur une flûte d'hydrophones et/ou de géophones tractée par un
30 navire en synchronisme avec le boomer est ainsi représentatif des couches profondes du sous-sol.

En revanche, les caractéristiques fréquentielles du signal émis à très basse fréquence sont mal contrôlées, de sorte que ces systèmes ne fournissent que des indications qualitatives des strates profondes du sous-sol, à des profondeurs typiquement supérieures à 10 mètres, et avec des résolutions verticales typiquement supérieures à 1 mètre.

Les sondeurs de sédiment récents présentent l'avantage d'utiliser des signaux contrôlés ("chirp" ou sources paramétriques) qui insonifient le fond verticalement à forte puissance. Toutefois, la réception des signaux, assurée par le même transducteur, limite significativement les performances pour des raisons instrumentales (saturation électronique) et physiques (mélange de phénomènes de rétro-diffusion et de réflexion spéculaire, ambiguïté épaisseur/vitesse dans les couches).

Dans ce contexte, la présente invention vise à proposer un procédé répondant au besoin, aujourd'hui non satisfait, de permettre la détermination quantifiée des propriétés géotechniques du sous-sol d'un fond sub-aquatique sur les premiers mètres, typiquement sur les cinq premiers mètres au moins, et avec une résolution au plus égale à cinquante centimètres.

A cette fin, le procédé de l'invention, par ailleurs conforme à la définition générique qu'en donne le préambule ci-dessus, est essentiellement caractérisé en ce que la phase d'investigation inclut une opération de déplacement, concomitante avec les opérations d'excitation et d'acquisition, et mise en œuvre en

- déplaçant simultanément la source acoustique et la flûte dans la nappe d'eau, en ce que la phase de pré-traitement est mise en œuvre en déduisant, à partir des signaux de mesure, de la signature de l'onde acoustique incidente, et des données géométriques, des signaux de réflexion ayant atteint des récepteurs différents à la suite d'une même émission d'onde incidente, et en regroupant, sous forme de séries de signaux de réflexion recalés, des signaux de réflexion ayant atteint, sous des angles de rasance différents, des récepteurs différents en provenance d'une même zone du fond à la suite de différentes émissions de l'onde incidente, et en ce que la phase d'analyse est mise en œuvre en déduisant les paramètres physiques de chaque strate du fond, à partir des séries de signaux de réflexion recalés, par exploitation de la dépendance angulaire et fréquentielle du coefficient de réflexion de l'onde incidente sur chaque interface, chaque signal de réflexion recalé étant interprété comme une somme d'arrivées retardées et atténuées de rayons propres correspondant à la réflexion de l'onde incidente par les différentes strates de la zone du fond à laquelle correspond ce signal de réflexion recalé.
- 25 En pratique, chaque onde réfléchie atteignant le centre de la flûte dans une fenêtre temporelle de réception est avantageusement issue de la réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance au plus égal à 70 degrés et au moins égal à 10 degrés, et
- 30 de préférence compris entre 25 et 65 degrés.

Chaque récepteur est par exemple séparé de la source acoustique par une distance comprise entre environ 1 fois

et environ 4 fois la hauteur d'eau moyenne sous les instruments, chaque récepteur pouvant par ailleurs être espacé d'un récepteur voisin par une distance comprise entre environ 0.375 fois et environ 1 fois la hauteur moyenne suivant le nombre de ces récepteurs.

Selon un autre mode d'évaluation des distances, chaque récepteur est typiquement séparé d'un récepteur voisin par une distance correspondant à une différence d'angle de rasance au moins égale à 2 degrés, et de préférence au moins égale à 5 degrés, des signaux de réflexion respectivement reçus par ce récepteur et par le récepteur voisin.

De préférence, l'onde incidente présente, dans chaque fenêtre d'émission, au moins une composante de fréquence relativement basse, dont la fréquence est au moins égale à 100 Hz, cette onde incidente présentant utilement aussi, dans chaque fenêtre d'émission, au moins une composante de fréquence relativement haute, dont la fréquence est au plus égale à 8 kHz.

Dans un mode de réalisation possible de l'invention, l'onde incidente peut ainsi présenter, dans chaque fenêtre d'émission, une fréquence continûment variable entre une composante de fréquence relativement basse et une composante de fréquence relativement haute.

Pour obtenir à la fois une information suffisamment riche et une séparation satisfaisante des ondes réfléchies, les fenêtres temporelles d'émission ont chacune par exemple une durée au moins égale à 0.1 seconde, et de préférence au moins égale à 0.5 seconde, et sont répétées

périodiquement avec une période par exemple au moins égale à 0.5 seconde et de préférence au moins égale à 1 seconde.

- 5 Dans son mode de réalisation préféré, le procédé de l'invention comprend, en amont de la phase d'analyse, une opération de détermination de la profondeur d'immersion de la source acoustique et/ou de la profondeur d'immersion d'un point de la flûte et/ou de la hauteur
10 d'eau.

La phase d'analyse est par exemple mise en œuvre en parcourant, de façon itérative, une boucle incluant une opération de modélisation au cours de laquelle sont
15 calculés, à partir de paramètres physiques fictifs virtuellement attribués à la première strate au moins de la pluralité de strates, et pour les différents récepteurs, des signaux de réflexion recalés fictifs respectifs issus de signaux de mesure virtuellement
20 produits par ces récepteurs en présence de ces paramètres fictifs, une opération de soustraction au cours de laquelle sont formés des écarts constatés entre les signaux de réflexion recalés respectifs issus des signaux de mesure réellement produits par ces récepteurs
25 et les signaux de réflexion recalés fictifs correspondants, et une opération d'optimisation et de rétroaction à l'issue de laquelle les paramètres physiques fictifs sont révisés en fonction des écarts constatés.

30

Le procédé de l'invention permet ainsi une caractérisation géotechnique de chaque strate d'une pluralité de strates d'un fond sub-aquatique au moyen de

paramètres physiques choisis dans l'ensemble de paramètres qui comprend l'épaisseur de cette strate, la densité de cette strate, la vitesse du son dans cette strate, l'atténuation du son dans cette strate, la
5 rugosité de cette strate, et un gradient de célérité du son à l'intérieur de cette strate.

Dans son mode de réalisation préféré, le procédé de l'invention permet d'identifier les différentes strates
10 du sous-sol sub-aquatique avec des résolutions verticales de l'ordre de dix centimètres.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est
15 faite ci-après, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en perspective d'un équipement mettant en œuvre le procédé de l'invention ;
20
- la figure 2 est un diagramme schématique présentant de façon approximativement chronologique les principales phases et opérations du procédé de l'invention ;
- 25 - la figure 3, composée des schémas 3A à 3C, illustre de manière intuitive et partielle l'étape RECAL de recalage et de regroupement de signaux de réflexion mise en oeuvre pendant le déroulement du procédé de l'invention, cette étape conduisant notamment à regrouper des signaux de
30 réflexion provenant d'une même zone du fond;
- la figure 4, composée des schémas 4A et 4B, complète l'illustration de l'étape RECAL;

- la figure 5, composée des schémas 5A et 5B, illustre partiellement les mécanismes de propagation acoustique multiple dans l'eau, et leur exploitation dans l'invention;

- la figure 6 illustre partiellement les mécanismes de propagation acoustique multiple dans le fond sub-aquatique;

10

- les figures 7A à 7J sont des diagrammes représentant, en fonction du temps t exprimé en nombre d'échantillons, l'amplitude relative A de signaux de mesure respectivement produits par 10 récepteurs successifs de plus en plus éloignés de la source acoustique et séparés les uns des autres par une distance importante, et mettant en évidence l'influence des angles avec lesquels les ondes se réfléchissent au fond ; et

20 - les figures 8A à 8J sont des diagrammes représentant, en fonction du temps t exprimé en nombre d'échantillons, l'amplitude relative A de signaux de mesure respectivement produits par 5 récepteurs successifs de plus en plus éloignés de la source acoustique et pour une modulation de basses fréquences à gauche et pour une modulation de fréquences hautes à droite, mettant en évidence l'influence des fréquences utilisées.

NOTATIONS

30 Le lecteur trouvera ci-après quelques-uns des symboles utilisés pour identifier les différentes entités impliquées dans la mise en œuvre de l'invention :

"i" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque hydrophone en le distinguant ainsi des autres hydrophones;

- 5 "j" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque strate du fond sub-aquatique en la distinguant ainsi des autres strates du fond;

10 "J" est un nombre entier désignant le nombre total de strates observables;

"k" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque rayon propre d'une onde acoustique en le distinguant des autres rayons propres;

15

"l" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque émission d'une onde acoustique incidente (encore appelée "tir") en la distinguant ainsi des autres émissions d'une onde acoustique;

20

"n" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque boucle d'itération de la phase d'analyse en la distinguant ainsi des autres boucles d'itération;

- 25 "e" est un indice attribué à une valeur finale exacte d'un paramètre;

$s(t)$ désigne l'onde acoustique incidente;

30 $s_i(t, l)$ désigne le signal de mesure reçu sur le $i^{\text{ème}}$ hydrophone à la suite du $l^{\text{ième}}$ tir;

$e_i(t, l)$ désigne l'enveloppe de l'intercorrélation entre l'onde acoustique incidente $s(t)$ et le signal de mesure $s_i(t, l)$;

- 5 $rf_i(t, l)$ désigne le signal de réflexion associé au signal de mesure $s_i(t, l)$ par application à l'enveloppe $e_i(t, l)$ d'une fenêtre de réception;

$Rf_i(t, B)$ désigne un signal de réflexion recalé, issu du
10 signal de réflexion $rf_i(t, l)$ par une étape de recalage RECAL et associé au fond B;

$Rfs_i(t, B)$ désigne un signal de réflexion recalé fictif, obtenu par simulation;

- 15 $Rfs_i^k(t, B)$ désigne le $k^{i\text{ème}}$ rayon propre du signal de réflexion recalé $Rf_i(t, B)$; et

$\theta_i^k(j)$ désigne l'angle de rasance sur la $j^{i\text{ème}}$ strate du
20 $k^{i\text{ème}}$ rayon propre du signal de réflexion recueilli sur le $i^{i\text{ème}}$ hydrophone.

Comme indiqué précédemment, l'invention concerne (figure 1) un procédé de caractérisation géotechnique d'un fond
25 sub-aquatique B, tel qu'un fond sous-marin, recouvert d'une nappe d'eau de hauteur totale H déterminée.

Ce fond B comprend une pluralité de strates telles que F1, F2, etc. (figure 6), génériquement notées F_j et
30 présentant chacune des paramètres physiques propres.

La première strate F1 forme une interface avec l'eau, les autres strates s'étendant en dessous de cette première strate à des profondeurs diverses.

- 5 Le procédé de l'invention vise, pour chacune des strates Fj d'un ensemble de strates comprenant typiquement, mais non limitativement, entre deux et cinq strates, à déterminer plusieurs paramètres distinctifs de cette strate, tels que l'épaisseur h_j de cette strate, sa
10 densité ρ_j , la vitesse du son C_j dans cette strate, et plus précisément la vitesse C_{pj} pour des ondes de compression et la vitesse C_{sj} pour des ondes de cisaillement, l'atténuation du son α_j dans cette strate, et plus précisément l'atténuation α_{pj} pour des ondes de
15 compression et l'atténuation α_{sj} pour des ondes de cisaillement, ainsi, éventuellement, que la rugosité dans cette strate, ou un gradient de célérité du son.

Le procédé de l'invention comprend essentiellement une
20 phase d'investigation INVESTIG, une phase de pré-traitements PRE_TRAIT et une phase d'analyse ANA.

La phase d'investigation INVESTIG inclut elle-même une opération de déplacement DEPL, une opération d'excitation
25 acoustique EXCIT, une opération d'acquisition ACQUI, et une opération RELEV de relevé de données non acoustiques, ces opérations étant mises en œuvre de façon globalement simultanée.

L'opération de déplacement DEPL consiste à déplacer dans
30 la nappe d'eau, au moyen d'un navire N et à vitesse réduite idéalement constante, une source acoustique 1 et une flûte 2 au-dessus du fond B, la flûte 2 comprenant

par exemple trois, quatre, ou cinq récepteurs acoustiques 21 à 24, encore appelés hydrophones.

5 L'opération RELEV de relevé de données non acoustiques comprend elle-même une opération CAPT de capture de données environnementales et une opération de repérage REPER.

10 L'opération CAPT de capture de données environnementales consiste à enregistrer à chaque instant t les profondeurs de la source acoustique 1 et d'un point de la flûte 2, ainsi que la hauteur d'eau H .

15 L'opération de repérage REPER consiste à enregistrer, à chaque instant t , les coordonnées X et Y du point du navire N .

L'opération EXCIT d'excitation acoustique est mise en œuvre en émettant de façon aussi isotrope que possible, 20 notamment vers le fond B et depuis la source acoustique immergée 1, l'onde acoustique incidente $s(t)$, de signature fréquentielle connue.

L'opération d'acquisition ACQUI est, quant à elle, mise 25 en œuvre en produisant, au moyen des récepteurs immergés 21 à 24, des signaux de mesure respectifs $s_1(t, l)$, $s_2(t, l)$, $s_3(t, l)$ et $s_4(t, l)$ (génériquement notés $s_i(t)$) en réponse à une détection d'ondes acoustiques respectives propagée dans l'eau, et en enregistrant ces 30 signaux en fonction du temps t .

Comme le montre la figure 1, la source 1 et la flûte 2 restent à distance du fond B et se trouvent

respectivement immergées à des profondeurs Z_s et Z_r , éventuellement égales, la flûte 2 étant au moins approximativement alignée sur la source 1 et au moins approximativement parallèle au fond B.

5

Les profondeurs d'immersion de la source 1 et des récepteurs 21 à 24 sont par exemple enregistrées par des capteurs de pression, la profondeur d'eau H étant par exemple enregistrée à l'aide d'un sondeur de bathymétrie.

10

La hauteur totale de la nappe d'eau au-dessus du fond B étant notée H , la source 1 et la flûte 2 se trouvent ainsi globalement, par rapport au fond B, à une hauteur moyenne H_m typiquement comprise entre 10 mètres et 20 mètres.

15

Les récepteurs 21 à 24 sont espacés les uns des autres, chaque récepteur étant séparé d'un récepteur voisin par une distance d qui peut être constante ou évolutive le long de la flûte 2.

20

La flûte 2 est considérée comme délimitée entre les deux récepteurs extrêmes 21 et 24, qui sont donc équidistants du centre 20 de cette flûte. On note D_i , la distance horizontale séparant l'émetteur du $i^{\text{ème}}$ hydrophone et Z_{ri} la profondeur du $i^{\text{ème}}$ hydrophone.

25

La phase d'analyse ANA, qui est destinée à permettre l'identification des paramètres physiques tels que h_j , ρ_j , C_j , α_j de chaque strate F_j du fond B, exploite à cette fin la signature fréquentielle de l'onde acoustique incidente $s(t)$, et les signaux de mesure $s_i(t, l)$ des différents récepteurs 21 à 24.

30

Le procédé de l'invention concentre d'abord son analyse sur les signaux $s_i(t)$ propagés entre la source 1 et les récepteurs 21 à 24.

5

Pour ce faire, l'onde incidente $s(t)$, aussi isotrope que possible, est émise par la source 1, de directivité connue, dans des fenêtres temporelles d'émission successives disjointes, et le signal de mesure $s_i(t, l)$ de
10 chaque récepteur est lui-même analysé dans des fenêtres temporelles de réception successives disjointes, au cours desquelles sont détectés les signaux propagés.

Dans ces conditions, chaque signal reçu $s_i(t)$ est
15 constitué de répliques atténuées et retardées du signal émis $s(t)$ pour le tir noté T1, la structure du signal reçu $s_i(t)$ étant ainsi fonction de la géométrie du trajet multiple que l'onde acoustique parcourt dans l'eau (figure 5).

20

Ce trajet multiple comprend principalement un trajet direct de l'onde acoustique depuis la source 1 jusqu'à chacun des récepteurs 21 à 24, un trajet dit "réfléchi fond" de l'onde acoustique depuis la source 1 jusqu'à
25 chacun des récepteurs 21 à 24 via réflexion sur le fond, l'onde acoustique ayant parcouru ce trajet donnant naissance au signal de réflexion $rf_i(t, l)$, et un trajet dit "réfléchi surface" de l'onde acoustique depuis la source 1 jusqu'à chacun des récepteurs 21 à 24 après
30 réflexion à la surface de l'eau.

Dans le cas particulier des fonds à faible hauteur d'eau H ou "petits fonds", on utilisera avantageusement le

trajet de réfléchi surface, voire le trajet dit de "réfléchi fond-surface" impliquant une réflexion de l'onde acoustique à la fois sur le fond et sur la surface entre son émission par la source 1 et sa détection par
5 l'un des récepteurs 21 à 24.

La mesure des temps d'arrivée respectifs de ces trajets multiples dans l'eau permet d'une part de déterminer avec précision la géométrie du dispositif à l'instant de la
10 mesure et d'autre part d'établir des fenêtres de réception à l'intérieur desquelles se concentrera l'analyse des réfléchis fond.

Plus précisément, le procédé de l'invention concentre son
15 analyse sur les signaux de mesure issus d'ondes réfléchies une seule fois par le même fond B. Comme indiqué sur la figure 3, dont les différents schémas 3A à 3C correspondent à des tirs différents, un ordonnancement de plusieurs tirs consécutifs permet alors de recueillir
20 les signaux notés $Rf_i(t, B)$ issus de la réflexion de l'onde acoustique incidente sur une même zone de fond B et sous autant d'angles de rasance différents qu'il existe de récepteurs tels que 21 à 24.

25 Comme le montre la figure 4, les différents signaux de réflexion $rf_i(t, l)$ recueillis, lors d'un tir l , sur chacun des récepteurs 21 à 24 dans une fenêtre d'observation correspondant à la réception d'un écho unique sur le fond doivent donc être respectivement
30 associés à différents signaux de réflexion $rf_i(t, l')$, $rf_i(t, l'')$, $rf_i(t, l''')$ etc., recueillis, lors d'autres tirs l' , l'' , l''' , etc. sur chacun des récepteurs 21 à 24 pour former les signaux dits de "réfléchi fond" ou de

réflexion recalés $Rf_i(t,B)$, cette opération étant effectuée à une étape de recalage RECAL qui sera détaillée ultérieurement.

- 5 En réalité, chaque signal de réfléchi fond $Rf_i(t,B)$ est lui-même composite en ce sens qu'il est formé (figure 6) par la propagation, suivant un trajet multiple, de l'onde acoustique incidente dans le fond B, donnant lieu à des réflexions de cette onde incidente sur les différentes
10 strates F_j du sous-sol sub-aquatique.

Dans ces conditions, chaque signal de réfléchi fond $Rf_i(t,B)$ peut être décrit sous la forme d'un ensemble de rayons propres notés $Rfs_i^k(t,B)$, l'indice k se rapportant
15 au $k^{\text{ième}}$ rayon propre associé à l'onde incidente $Rf_i(t,B)$. Le rapport d'amplitude entre le signal temporel incident et réfléchi à l'interface F_j est directement proportionnel à la transformée de Fourier du coefficient de réflexion $R_j(f, \theta_i^k(j))$, l'indice k se rapportant ici à
20 l'angle $\theta_i^k(j)$ avec lequel le $k^{\text{ième}}$ rayon propre vient se réfléchir sur l'interface F_j .

Or, ce coefficient de réflexion $R_j(f, \theta_i^k(j))$, dans le cadre d'une modélisation de Rayleigh, est relié aux
25 paramètres géotechniques des différentes strates F_{j-1} F_j du sous-sol.

Les signaux ainsi produits et exploités portent la signature de l'environnement rencontré par les ondes
30 détectées, et contiennent donc une information suffisamment riche et pertinente du fond B pour permettre

d'en extraire sans ambiguïté les paramètres géotechniques des différentes strates F_j du sous-sol.

5 L'écho d'une onde incidente parvenant au fond B sous un angle de rasance θ très rasant n'est pratiquement sensible qu'à l'atténuation acoustique de la strate F_1 .

10 L'écho d'une onde incidente parvenant au fond B sous une incidence perpendiculaire au fond B n'est pratiquement sensible qu'aux changements d'impédance acoustique et présente notamment le défaut de ne pas pouvoir permettre sans ambiguïté la détermination du couple épaisseur-vitesse de chacune des strates.

15 De façon générale, il est donc préférable de récupérer des signaux ayant subi une réflexion à des angles de rasance assez faibles sur chacune des strates F_j composant le fond.

20 Ainsi, des angles de rasance modérés sont nécessaires pour décrire la première strate F_1 et des angles de rasance plus importants sont nécessaires pour décrire les couches plus profondes, F_2 , etc. Il est donc apparu très opportun de faire en sorte, pour l'invention, que chaque
25 onde réfléchie atteignant l'un des récepteurs 21 à 24 dans une fenêtre temporelle de réception soit issue de la réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond B sous un angle de rasance θ_k au plus égal à 70 degrés et au moins égal à 10 degrés.

30

Bien que les figures 5 et 6 soient à la fois totalement schématiques et incomplètes compte tenu de leur mode de présentation simplifié et purement spatial, elles

illustrent, de façon intuitive, ce que sont les trajets multiples de l'onde incidente, respectivement dans l'eau et dans le fond.

5 L'importance ci-dessus discutée des angles d'émission vis à vis du réfléchi fond peut être observée sur les courbes des figures 7A à 7J, correspondant respectivement aux ondes recueillies sur des récepteurs disposés à des distances correspondant à des angles de rasance au fond
10 décroissant de 72 à 25 degrés.

Ainsi, il apparaît que la courbe 7B, qui correspond à des angles de rasance forts, apporte peu d'information relativement à la courbe 7A puisque pour ces angles, le
15 coefficient de réflexion de chaque strate est pratiquement indépendant de l'angle de rasance. De même, il apparaît que les courbes 7I et 7J qui correspondent à des angles de rasance faibles n'apportent plus d'information puisque les ondes ne pénètrent pas dans le
20 fond. Inversement, les figures 7B à 7I qui correspondent à un balayage angulaire pertinent, présentent une forte variabilité permettant de retrouver sans ambiguïté les caractéristiques du fond.

25 De même, alors que la signature d'une onde incidente très basse fréquence est difficile à maîtriser, et qu'une onde à haute fréquence présente une capacité de pénétration nulle dans les strates profondes, il est apparu très opportun, pour l'invention, d'utiliser une onde incidente
30 présentant une composante de fréquence relativement basse au moins égale à 100 Hz, et une composante de fréquence relativement haute au plus égale à 8 kHz, cette onde incidente présentant par exemple, dans chaque fenêtre

d'émission, une fréquence continûment variable entre 100 Hz et 8 kHz.

La relation liant la profondeur de pénétration d'une onde
5 acoustique incidente à la fréquence de cette onde est
clairement illustrée par les figures 8A à 8J, qui
représentent, pour 5 angles de rasance θ_i différents de
l'onde incidente compris entre 25 et 70 degrés, la
réponse $Rf_i(t, B)$ du signal temporel réfléchi au fond,
10 pour un signal d'émission compris entre 400 et 3200 Hz
(figures 8A à 8E) et compris entre 5400 et 8200 Hz
(figure 8F à 8J). Bien que présentant la même résolution
temporelle que les signaux basse fréquence, les signaux
haute fréquence sont sensiblement appauvris par
15 l'atténuation des ondes dans les diverses strates.

Ainsi, grâce à un choix approprié de l'angle de rasance
et grâce à une variation de la fréquence acoustique
d'excitation, les paramètres physiques h_j , ρ_j , C_j , α_j de
20 chaque strate F_j peuvent être déduits de l'onde incidente
 $s(t)$ et des signaux de mesure $s_i(t, l)$ par l'intermédiaire
d'un modèle physique faisant intervenir les coefficients
de réflexion acoustique $R_j(\theta_i^k(j))$ des strates F_j du fond
B vu par les rayons propres $Rfs_i^k(t, B)$, leur atténuation
25 α_j , ainsi que leur dépendance fréquentielle.

Autrement dit, le modèle physique employé permet de tirer
parti des dépendances angulaires du coefficient de
réflexion et de la dépendance fréquentielle de
30 l'atténuation dans les strates.

En pratique, il est souvent utile de faire en sorte que
chaque onde réfléchie atteignant le centre 20 de la flûte

2 dans une fenêtre temporelle de réception soit issue de la réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance θ_i au plus égal à 70 degrés et au moins égal à 10 degrés, l'angle de rasance θ_i pouvant
5 même le plus souvent être idéalement choisi dans une plage angulaire comprise entre 25 et 65 degrés.

Chaque récepteur 21 à 24 est alors séparé de la source acoustique 1 par une distance D comprise entre environ 1
10 fois et environ 4 fois la hauteur moyenne H_m , la valeur $D = H_m$ concernant essentiellement le récepteur 21 le plus proche de la source 1, et la valeur $D = 4.H_m$ concernant plutôt le récepteur 24 le plus éloigné de la source 1.

15 Dans ces conditions, chaque récepteur, tel que 21 à 23, est espacé d'un récepteur voisin, tel que 22 à 24, par une distance d permettant une discrétisation la plus régulière possible de l'angle de rasance.

20 En pratique, les fenêtres temporelles d'émission ont chacune une durée au moins égale à 0.1 seconde, et de préférence plutôt au moins égale à 0.5 secondes. De façon générale, la durée choisie est un compromis entre un signal court minimisant les effets du mouvement du navire
25 et un signal plus long augmentant le rapport signal à bruit.

Ces fenêtres d'émission sont répétées périodiquement avec une période dépendant de leur durée individuelle, au
30 moins égale à 0.5 secondes, et de préférence plutôt au moins égale à 1 seconde. De façon générale, la durée du silence entre deux tirs est un compromis entre une durée élevée permettant une séparation satisfaisante des

signaux reçus et une durée faible permettant une plus grande résolution au sol.

Dans le cas préféré, les signaux de mesure sont analysés
5 par tranche de 2 secondes et traités par tir, un tir correspondant à un jeu de signaux formé d'un signal émis et des signaux de mesure correspondants reçus par les récepteurs respectifs 21 à 24.

10 Entre la phase d'investigation INVESTIG telle que précédemment décrite, et la phase d'analyse ANA qui sera davantage détaillée ultérieurement, le procédé de l'invention comprend une phase de pré-traitement notée PRE_TRAIT.

15 Cette phase de pré-traitement PRE_TRAIT comprend une opération de filtrage FIL_COR, une opération de calcul géométrique INVER_GEOM, et une étape de recalage RECAL.
Au cours de l'opération FIL_COR, chaque signal de mesure
20 $s_i(t)$ est filtré pour normaliser ce signal en tenant compte de la signature fréquentielle de l'onde acoustique incidente $s(t)$.

Au cours de l'opération INVER_GEOM, la géométrie de
25 l'instrumentation lors du tir est recalculée et les fenêtres temporelles de réception sont identifiées pour pouvoir extraire les signaux de réflexion $rf_i(t, l)$.

Enfin, au cours de l'étape RECAL, chaque signal de mesure
30 extrait est associé à une position géographique du fond repérée par ses coordonnées X et Y, et recalé de façon à tenir compte du déplacement du navire entre chaque tir et le tir suivant, l'étape RECAL produisant ainsi un jeu de

signaux de réflexion recalés $Rf_i(t, B)$ ayant vu une même zone de fond B lors de tirs différents et sous des angles de rasance différents.

- 5 Le filtrage effectué lors de l'opération FIL_COR, dit "adapté", est obtenu par estimation de l'enveloppe de l'intercorrélation entre le signal émis représenté par l'onde acoustique incidente $s(t)$, et chaque signal de mesure $s_i(t, l)$.
- 10 L'opération de filtrage consiste d'abord à effectuer la corrélation :

$$c_i(t, l) = \int s(\tau) \cdot s_i(t - \tau, l) d\tau ,$$

- 15 puis à effectuer une extraction d'enveloppe du signal $c_i(t, l)$ qui se réalise par exemple à l'aide d'une phase de démodulation selon $c_i(t, l) \cdot e^{-i2\pi f_c t}$, où f_c est la fréquence centrale du signal émis et suivie d'un filtrage passe-bas à la fréquence de coupure $F_{\text{coup}} > (F_{\text{max}} - F_{\text{min}})/2$ pour
- 20 obtenir le signal $e_i(t, l)$.

- Le calcul de la géométrie instrumentale exacte effectué lors de l'opération INVER_GEOM est basé sur l'identification des ondes réfléchies arrivant
- 25 successivement sur les différents récepteurs 21 à 24.

- Cette identification est obtenue par exemple à partir d'une détection de maximum à l'intérieur de fenêtres temporelles qui sont définies à partir de la géométrie a
- 30 priori de l'instrumentation.

On compare les temps mesurés $(\tau e_i^k)_m$ correspondant à cette détection aux temps $(\tau e_i^k)_s$ issus d'un modèle de rayons propres en milieu stratifié fournissant l'expression de la réponse impulsionnelle théorique :

5

$$Rie_i(t) = \sum_{k=1}^N A_i^k \cdot \delta(t - \tau e_i^k) \quad \text{Equation 1}$$

où N représente le nombre de trajets acoustiques pouvant relier un récepteur à l'émetteur, où t représente la variable temps, où τe_i^k représente le retard que
 10 présente, par rapport à l'émission de l'onde incidente, la réception d'une onde ayant suivi le $k^{i\text{ème}}$ trajet, où δ représente la fonction de Dirac, et où A_i^k représente l'amplitude relative, rapportée à celle de l'onde incidente émise, de l'onde ayant suivi le $k^{i\text{ème}}$ trajet et
 15 parvenant au récepteur avec un retard τe_i^k , la notation τe rappelant qu'il s'agit des retards associés au trajet multiple de l'onde acoustique dans l'eau.

Les retards associés au trajet direct et au réfléchi fond
 20 sont successivement donnés par :

$$\tau e_i^1 = \frac{\sqrt{(Zs - Zr_i)^2 + D_i^2}}{C_{moy}} \quad \text{et} \quad \tau e_i^2 = \frac{\sqrt{(2.H - Zs - Zr_i)^2 + D_i^2}}{C_{moy}}$$

où C_{moy} est la vitesse moyenne du son dans la colonne
 25 d'eau traversée par l'onde ayant suivi ce trajet et dans le cas particulier des grands fonds où les réflexions en surface ne sont pas exploitées.

Les instants théoriques prévus pour les différents rayons
 30 propres calculés sont comparés aux instants d'arrivées

des ondes réellement détectées par les différents récepteurs 21 à 24.

En cas de différence non négligeable, une recherche de la
5 géométrie exacte peut être effectuée par exemple par un
algorithme de recuit simulé à $2.N$ variables (D_i et Z_{r_i})
en minimisant une fonction de coût exprimée à partir des
différences entre les instants théoriques associés aux
rayons propres et les instants de détection des ondes
10 recueillies sur les N différents récepteurs 21 à 24.

Dans le cas particulier des petits fonds, d'autres
arrivées telles que le réfléchi-surface et même les
réfléchis surface-fond ou fond-surface sont détectés et
15 permettent de s'affranchir des mesures préalables de H et
 Z_s , grandeurs qui seront directement recherchées par
l'algorithme d'inversion géométrique décrit ci-dessus.

A partir de l'information alors disponible, qui est
20 constituée, pour chaque tir et chaque récepteur " i ", par
le signal $s_i(t)$ issu de ce récepteur et par la géométrie
du système, il convient de sélectionner la plage
temporelle correspondant à la fenêtre de réception dans
laquelle le signal reçu sera analysé, c'est-à-dire la
25 plage temporelle de réception de la seule contribution du
signal de réflexion $rf_i(t,l)$.

Cette sélection est par exemple effectuée, dans le cas
particulier des petits fonds, par un programme qui, pour
30 chaque enveloppe du signal $e_i(t,l)$ issu du $i^{\text{ème}}$ récepteur
sélectionne la fenêtre temporelle définie par :

$$rf_i(t,l) = e_i(\tau e_i^3 - Nt_e : \tau e_i^4 - Nt_e, l)$$

où ":" est un séparateur symbolique placé entre la borne temporelle inférieure et la borne temporelle supérieure de la fenêtre de réception sélectionnée, où τe_i^3 représente le retard associé au réfléchi fond, où τe_i^4 représente le retard associé au premier réfléchi surface-fond, où N est un paramètre dépendant de la nature du signal émis, et où t_e est la période d'échantillonnage de chaque récepteur, les indices 3 et 4 étant liés à un cas particulier des petits fonds dans lequel l'ordre d'arrivée des rayons propres serait successivement le trajet direct, le réfléchi-surface, le réfléchi-fond et le réfléchi surface-fond.

15

L'opération de recalage RECAL consiste à utiliser les données de position (X,Y) avec les positions des instruments associé au tir correspondant de façon à calculer les positions $B_i^1(X,Y)$ du fond vu par l'hydrophone i lors du tir l. En répétant l'opération pour plusieurs tirs consécutifs, il devient possible de reconstituer le jeu de données $Rfi(t,B)$ constitué des i réfléchis fonds ayant vu le fond $B(X,Y)$ sous les différents angles de raseance θ_i .

25

A titre d'exemple, pour une configuration définie par une distance de 10m entre la source 1 et le premier hydrophone 21 de la flûte, pour une flûte à 4 hydrophones séparés les uns des autres de 10m, horizontale et située à 10m au dessus du fond, pour un navire se déplaçant à la vitesse régulière de 5m/s et avec une durée de 2 secondes entre tirs successifs, on appliquera successivement un

30

décalage de 1 tir pour le 2^{ième} hydrophone 22, de 2 tirs pour le 3^{ième} hydrophone 23, et de 3 tirs pour le 4^{ième} hydrophone 24 comme rappelé dans le Tableau 1 suivant.

N ^o de tir	Signaux extraits	Décal.	Recalage
Tir 1	$rf_1(t, l)$	0	$rf_1(t, l) \rightarrow Rf_1(t, B)$
Tir 1+1	$rf_1(t, l+1)$	1	$rf_2(t, l+1) \rightarrow Rf_2(t, B)$
Tir 1+2	$rf_1(t, l+2)$	2	$rf_3(t, l+2) \rightarrow Rf_3(t, B)$
Tir 1+3	$rf_1(t, l+3)$	3	$rf_4(t, l+3) \rightarrow Rf_4(t, B)$

5

Tableau 1: Principe de l'opération de recalage des tirs

Une fois identifiée et extraite, pour chaque récepteur, l'onde détectée ayant subi une réflexion unique et par le fond B, la phase d'analyse ANA est mise en œuvre pour permettre de déduire de cette onde les paramètres géotechniques du fond au moyen d'un modèle fondé sur l'expression du coefficient de réflexion de Rayleigh.

Comme évoqué précédemment, la modélisation des interactions des ondes acoustiques avec le fond et ses différentes strates est basée sur la représentation de chaque strate sur une base de plusieurs paramètres incluant l'épaisseur h de cette strate, la densité ρ (par exemple en g/cm^3), la vitesse du son $C_{p/s}$ (par exemple en m/s) et l'atténuation du son $\alpha_{p/s}$ (par exemple en dB/λ) ; les indices p et s se rapportant respectivement aux ondes de compression et aux ondes de cisaillement.

Dans les couches sédimentaires, la rugosité ou encore un gradient de célérité peuvent dans certains cas être ajoutés à ces principaux paramètres physiques.

Partant du fait que le réfléchi fond se décompose lui-même comme une somme de rayons propres réfléchis par les différentes strates du fond, on peut également en écrire sa réponse impulsionnelle selon :

$$Rl b_i(t) = \sum_{k=1}^N A_i^k \cdot \delta(t - \tau b_i^k)$$

τb_i^k se rapportant au fait qu'il s'agit du trajet multiple de l'onde acoustique dans le fond.

Considérant maintenant $E(t)$, l'autocorrélation de l'enveloppe du signal émis, on obtient $Rf_i(t)$ par :

$$Rf_{s_i}(t, B) = E(t) \otimes \sum_{k=1}^N A_i^k \cdot \delta(t - \tau b_i^k) = \sum_{k=1}^N A_i^k \cdot E(t - \tau b_i^k) = \sum_{k=1}^N rfs_i^k(t, B)$$

l'indice s précisant qu'il s'agit du réfléchi fond simulé.

Concernant la détermination de ces rayons propres, il s'agit en particulier de calculer les k angles de tirs (angle de rasance au niveau de la source 1) des k rayons propres recherchés.

On part de l'angle θ_i^0 défini par :

$$\theta_i^0 = A \tan\left(\frac{2 \cdot H - Z_s - Z_{r_i}}{D_i}\right)$$

On effectue alors une recherche dichotomique de l'angle de tir $\theta_i^k(0)$ entre θ_i^0 et $\theta_i^0 + \theta_{\max}$ en utilisant les relations :

$\frac{\cos \theta_i^k(j)}{C_j} = \frac{\cos \theta_i^k(j+1)}{C_{j+1}}$ entre les strates F_j et F_{j+1} , en notant $\theta_i^k(j)$ l'angle dans la couche F_j du rayon partant avec un angle de tir $\theta_i^k(0)$, et

5

$$D_i = \frac{(2.H - Zr_i - Zs)}{\tan \theta_i^k(0)} + \sum_{j=1} \frac{2.N(j,k).h(j)}{\tan \theta_i^k(j)} + \varepsilon$$

en considérant ici le $k^{\text{ième}}$ rayon propre du réfléchi fond associé à la géométrie du capteur i comme le rayon propre se réfléchissant au plus profond sur la $J^{\text{ième}}$ strate, et en notant $N(j,k)$ le nombre de réflexions du rayon k dans la couche F_j .

Un test doit préalablement être effectué pour s'assurer de l'existence de ce rayon $N(1,k)$.

Dans le cas où A_i est une fonction de la fréquence, on a :

20

$$Rfs_i(t, B) = \sum_{k=1}^N A_i^k(t) . E(t - \tau b_i^k)$$

$$A_i^k(t) = FFT^{-1}(A_i^k(f))$$

Dans le cas particulier d'interfaces planes et sans réflexion multiple dans aucune couche,

25

$$A_i^k(f) = \left(\frac{1}{\sum_{j=0}^{J-1} d_j} \right) . e^{i2\pi f \cdot \sum_{j=0}^{J-1} t_j - \sum_{j=0}^{J-1} \alpha_j(f) . d_j} . r_J(f, \theta_i^k(J-1)) . \prod_{j=1}^{J-1} (1 - r_j^2(f, \theta_i^k(j-1)))$$

où d_j est la distance parcourue dans la strate F_j ,
 $t_j = d_j / c_j$ le temps correspondant, α_j l'atténuation du son
 dans la couche exprimée en Neper/m, et $R_j(f, \theta_i^k(j))$ le
 coefficient de réflexion à la $j^{\text{ème}}$ interface.

5

Le coefficient de réflexion de Rayleigh associé à une
 interface fluide-fluide est défini par :

$$r_j(f, \theta_i^k(j)) = \frac{\frac{\rho_{j+1} \cdot c_{j+1}}{\sin(\theta_i^k(j+1))} - \frac{\rho_j \cdot c_j}{\sin(\theta_i^k(j))}}{\frac{\rho_{j+1} \cdot c_{j+1}}{\sin(\theta_i^k(j+1))} + \frac{\rho_j \cdot c_j}{\sin(\theta_i^k(j))}}$$

10 où l'on utilise les célérités complexes :

$$c_j = \frac{C_j}{1 + \frac{i \cdot \alpha_j}{2 \cdot \pi \cdot 8,686}}$$

Ce modèle étant posé en amont de toute investigation, la
 15 phase d'analyse ANA peut l'utiliser pour extraire les
 paramètres géotechniques des différentes strates du sous-
 sol sub-aquatique à partir des signaux de réflexion
 recalés et corrigés $Rf_i(t, B)$ obtenus à la fin de la phase
 PRE_TRAIT.

20

Pour ce faire, la phase d'analyse ANA utilise par exemple
 une technique d'appariement de formes connue de l'homme
 de métier, auquel cas elle consiste à parcourir, de façon
 itérative, une boucle incluant une opération de
 25 modélisation MODEL, une opération de soustraction SOUST,
 et une opération d'optimisation et de rétroaction
 OPTI_RETR.

On rappelle que, par convention, l'indice "n" sera utilisé ci-après pour désigner de façon générique le nombre courant de fois que la boucle d'itération a été parcourue depuis le début de la phase ANA, et pour
5 repérer toute grandeur obtenue au $n^{\text{ième}}$ pas du parcours itératif de cette boucle.

La modélisation MODEL consiste à calculer, à chaque pas n, les signaux de réflexion recalés fictifs respectifs
10 $Rf_i^n(t, B_n)$ que produiraient les récepteurs 21 à 24 si le fond B était constitué par un fond noté B_n formé de strates F_j définies par des paramètres physiques fictifs h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj} virtuellement attribués à ces strates.

15 Les paramètres physiques fictifs initiaux h_{oj} , ρ_{oj} , C_{oj} , α_{oj} sont par exemple choisis sur la base d'indications géologiques générales sur le site à explorer, ou à défaut au hasard dans des fourchettes de valeurs plausibles ou simplement possibles, les valeurs prises par les
20 paramètres h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj} pour les valeurs non nulles de n étant définies de proche en proche par le parcours répété de la boucle d'itération.

A ces paramètres peut être ajouté le nombre J_n défini
25 comme le nombre total de strates supposées, lors de l'exécution du $n^{\text{ième}}$ pas de la boucle d'itération, avoir été détectées, ce nombre évoluant jusqu'à l'obtention, à l'issue de l'itération, du nombre total exact J_e de strates réellement détectées.

30

Pour l'obtention des paramètres exacts, la phase d'analyse ANA comprend tout d'abord une opération de soustraction SOUST au cours de laquelle sont calculés les

écarts Δ_{ni} que présentent, par rapport aux signaux de réflexion recalés fictifs $Rfs_i^n(t, B_n)$ préalablement calculés, les signaux de réflexion recalés filtrés et corrigés $Rf_i(t, B_e)$.

5

Puis, la phase d'analyse ANA comprend une opération d'optimisation et de rétroaction OPTI_RETR à l'issue de laquelle les paramètres physiques fictifs sont révisés en fonction des écarts constatés.

10

Pour ce faire, le procédé de l'invention calcule, à chaque pas d'itération n , une fonction de coût donnée par exemple par:

15

$$K(n) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\Delta_{ni})^2}$$

avec $\Delta_{ni} = Rfs_i^n(t, B_n) - Rf_i(t, B_e)$.

Cette fonction de coût est par exemple minimisée selon un
 20 algorithme de recuit simulé pour produire une réponse
 impulsionnelle affinée $Rfs_i^{n+1}(t, B_{n+1})$ définissant un
 nouveau fond B_{n+1} utilisé dans un nouveau pas d'itération
 de la phase ANA, le processus convergeant vers la
 production de paramètres exacts h_{ej} , ρ_{ej} , C_{ej} , α_{ej} des
 25 différentes strates j .

Le tableau ci-dessous donne un exemple de cas concret traité.

30

Géométrie :

$H=25\text{m}$, $Z_s=7\text{m}$, $Z_{r_i}=8\text{m}$, $D_1=12\text{m}$, $d_i=5\text{m}$, $J_e = 5$

Fond :

$Cp1^e=1750\text{m/s}$; $\rho1^e=1.8$; $\alpha1^e=0.5$; $h1^e=0.75\text{m}$;

$Cp2^e=1970\text{m/s}$; $\rho2^e=1.93$; $\alpha2^e=0.4$; $h2^e=1.75\text{m}$;

$Cp3^e=1793\text{m/s}$; $\rho3^e=1.85$; $\alpha3^e=0.5$; $h3^e=0.45\text{m}$;

$Cp4^e=2050\text{m/s}$; $\rho4^e=2.$; $\alpha4^e=0.38$; $h4^e=2.25\text{m}$;

$Cp5^e=3000\text{m/s}$; $\rho5^e=2.3$; $\alpha5^e=0.2$; $Cs5^e=1300\text{m/s}$; $\alpha5s^e=0.3$

Comme le comprendra l'homme du métier, au lieu d'utiliser une fonction de coût telle que $K(n)$ calculée au moyen une distance euclidienne, la phase d'analyse ANA pourrait
 5 tout aussi bien utiliser la recherche d'un maximum de corrélation entre les signaux $Rfs_i^n(t, B_n)$ et $Rf_i(t, B_e)$.

Comme néanmoins il s'agit, dans l'un et l'autre de ces deux cas, de révéler des écarts entre ces signaux et de
 10 faire évoluer le signal $Rfs_i^n(t, B_n)$ dans un sens propre à réduire ces écarts, les opérations précédemment évoquées de soustraction SOUST et de formation de tels écarts doivent être ici comprises dans un sens fonctionnel large incluant notamment une telle recherche de maximum de
 15 corrélation.

REVENDICATIONS.

1. Procédé de caractérisation géotechnique d'un fond
5 sub-aquatique (B), tel qu'un fond sous-marin, recouvert
d'une nappe d'eau de hauteur totale (H) déterminée, et
comprenant une pluralité de strates (F1, F2) formant
entre elles des interfaces de séparation, présentant
chacune des paramètres physiques propres (h_j , ρ_j , C_j , α_j)
10 et s'étendant à des profondeurs diverses en dessous d'une
première strate (F1) qui forme une interface de
séparation avec l'eau, ce procédé comprenant au moins une
phase d'investigation (INVESTIG), une phase de pré-
traitement (PRE_TRAIT) et une phase d'analyse (ANA), la
15 phase d'investigation (INVESTIG) incluant elle-même une
opération (EXCIT) d'excitation acoustique, mise en œuvre
en émettant au moins vers le fond (B), depuis une source
acoustique (1) immergée, une onde acoustique incidente
($s(t)$) de signature fréquentielle connue, une opération
20 d'acquisition (ACQUI) mise en œuvre en produisant, au
moyen d'une flûte (2) d'au moins quatre récepteurs (21 à
24) immergés, des signaux de mesure respectifs ($s_i(t, l)$)
résultant d'une détection d'ondes acoustiques respectives
réfléchies par le fond (B), et une opération de relevé
25 (RELEV) de données géométriques ($Z_s(t)$, $Z_r(t)$, $H(t)$,
 $X(t)$, $Y(t)$), la flûte (2) étant au moins
approximativement alignée sur la source (1) et distante
du fond (B), les récepteurs (21 à 24) étant espacés les
uns des autres, et l'onde incidente ($s(t)$) étant émise
30 dans chaque fenêtre d'une succession de fenêtres
temporelles d'émission disjointes, et présentant une
variation temporelle de fréquence à l'intérieur de chaque
fenêtre d'émission, caractérisé en ce que la phase

d'investigation (INVESTIG) inclut une opération de déplacement (DEPL), concomitante avec les opérations d'excitation (EXCIT) et d'acquisition (ACQUI), et mise en œuvre en déplaçant simultanément la source acoustique (1) et la flûte (2) dans la nappe d'eau, en ce que la phase de pré-traitement (PRE_TRAIT) est mise en œuvre en déduisant, à partir des signaux de mesure $s_i(t,l)$, de la signature de l'onde acoustique incidente ($s(t)$), et des données géométriques ($Z_s(t)$, $Z_r(t)$, $H(t)$, $X(t)$, $Y(t)$), des signaux de réflexion $rf_i(t,l)$ ayant atteint des récepteurs différents (21 à 24) à la suite d'une même émission d'onde incidente, et en regroupant, sous forme de séries de signaux de réflexion recalés ($Rf_i(t,B)$), des signaux de réflexion $rf_i(t,l)$ ayant atteint, sous des angles de rasance (θ_i) différents, des récepteurs différents (21 à 24) en provenance d'une même zone du fond à la suite de différentes émissions de l'onde incidente, et en ce que la phase d'analyse (ANA) est mise en œuvre en déduisant les paramètres physiques (h_j , ρ_j , C_j , α_j) de chaque strate (F1 à F4) du fond, à partir des séries de signaux de réflexion recalés ($Rf_i(t,B)$), par exploitation de la dépendance angulaire et fréquentielle du coefficient de réflexion de l'onde incidente sur chaque interface, chaque signal de réflexion recalé ($Rf_i(t,B)$) étant interprété comme une somme d'arrivées retardées et atténuées de rayons propres correspondant à la réflexion de l'onde incidente par les différentes strates de la zone du fond à laquelle correspond ce signal de réflexion recalé ($Rf_i(t,B)$).

30

2. Procédé de caractérisation géotechnique suivant la revendication 1, caractérisé en ce que chaque onde réfléchie atteignant un récepteur est issue de la

réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance (θ_i) au plus égal à 70 degrés et de préférence au plus égal à 65 degrés.

5 3. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que chaque onde réfléchie atteignant un récepteur est issue de la réflexion d'une onde incidente
10 moins égal à 10 degrés et de préférence au moins égal à 25 degrés.

4. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes,
15 caractérisé en ce que chaque récepteur (21 à 24) est séparé d'un récepteur voisin (22 à 24) par une distance (d) correspondant à une différence d'angle de rasance au moins égale à 2 degrés, et de préférence au moins égale à 5 degrés, des signaux de réflexion respectivement reçus
20 par ce récepteur et par le récepteur voisin.

5. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'onde incidente présente, dans
25 chaque fenêtre d'émission, au moins une composante de fréquence relativement basse, dont la fréquence est au moins égale à 100 Hz.

6. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes,
30 caractérisé en ce que l'onde incidente présente, dans chaque fenêtre d'émission, au moins une composante de

fréquence relativement haute, dont la fréquence est au plus égale à 8 kHz.

7. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'onde incidente présente, dans chaque fenêtre d'émission, une fréquence continûment variable entre une composante de fréquence relativement basse et une composante de fréquence relativement haute.

10

8. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les fenêtres temporelles d'émission ont chacune une durée au moins égale à 0.1 seconde et de préférence au moins égale à 0.5 seconde.

15

9. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les fenêtres temporelles d'émission sont répétées périodiquement avec une période au moins égale à 0.5 seconde et de préférence au moins égale à 1 seconde.

20

10. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les paramètres physiques sont au moins en partie choisis dans l'ensemble de paramètres comprenant l'épaisseur (h), la densité (ρ), la vitesse du son (C_p , C_s), l'atténuation du son (α_p , α_s), la rugosité, et un gradient de célérité du son.

30

11. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes,

caractérisé en ce qu'il comprend, en amont de la phase d'analyse (ANA), une opération (CAPT) de détermination de la profondeur d'immersion (Z_s) de la source acoustique et/ou de la profondeur d'immersion (Z_r) d'un point de la flûte et/ou de la hauteur d'eau H .

12. Procédé de caractérisation géotechnique suivant la revendication 10, caractérisé en ce que la phase d'analyse (ANA) est mise en œuvre en parcourant, de façon itérative, une boucle incluant une opération de modélisation (MODEL_FOND) au cours de laquelle sont calculés, à partir de paramètres physiques fictifs (h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj}) virtuellement attribués à la première strate (F1) au moins de la pluralité de strates, et pour les différents récepteurs (21 à 24), des signaux de réflexion recalés fictifs respectifs ($Rfs_i^n(t, B_n)$) issus de signaux de mesure virtuellement produits par ces récepteurs (21 à 24) en présence de ces paramètres fictifs (h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj}), une opération de soustraction (SOUST) au cours de laquelle sont formés des écarts (Δ_{ni}) constatés entre les signaux de réflexion recalés respectifs ($Rf_i(t, B)$) issus des signaux de mesure ($s_i(t, 1)$) réellement produits par ces récepteurs (21 à 24) et les signaux de réflexion recalés fictifs correspondants ($Rfs_i^n(t, B_n)$), et une opération d'optimisation et de rétroaction (OPTI_RETR) à l'issue de laquelle les paramètres physiques fictifs sont révisés en fonction des écarts constatés.

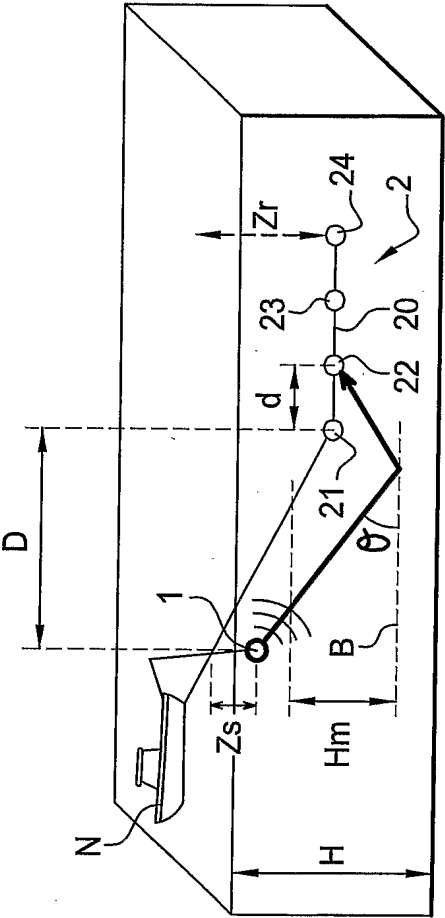


Fig. 1

2 / 6

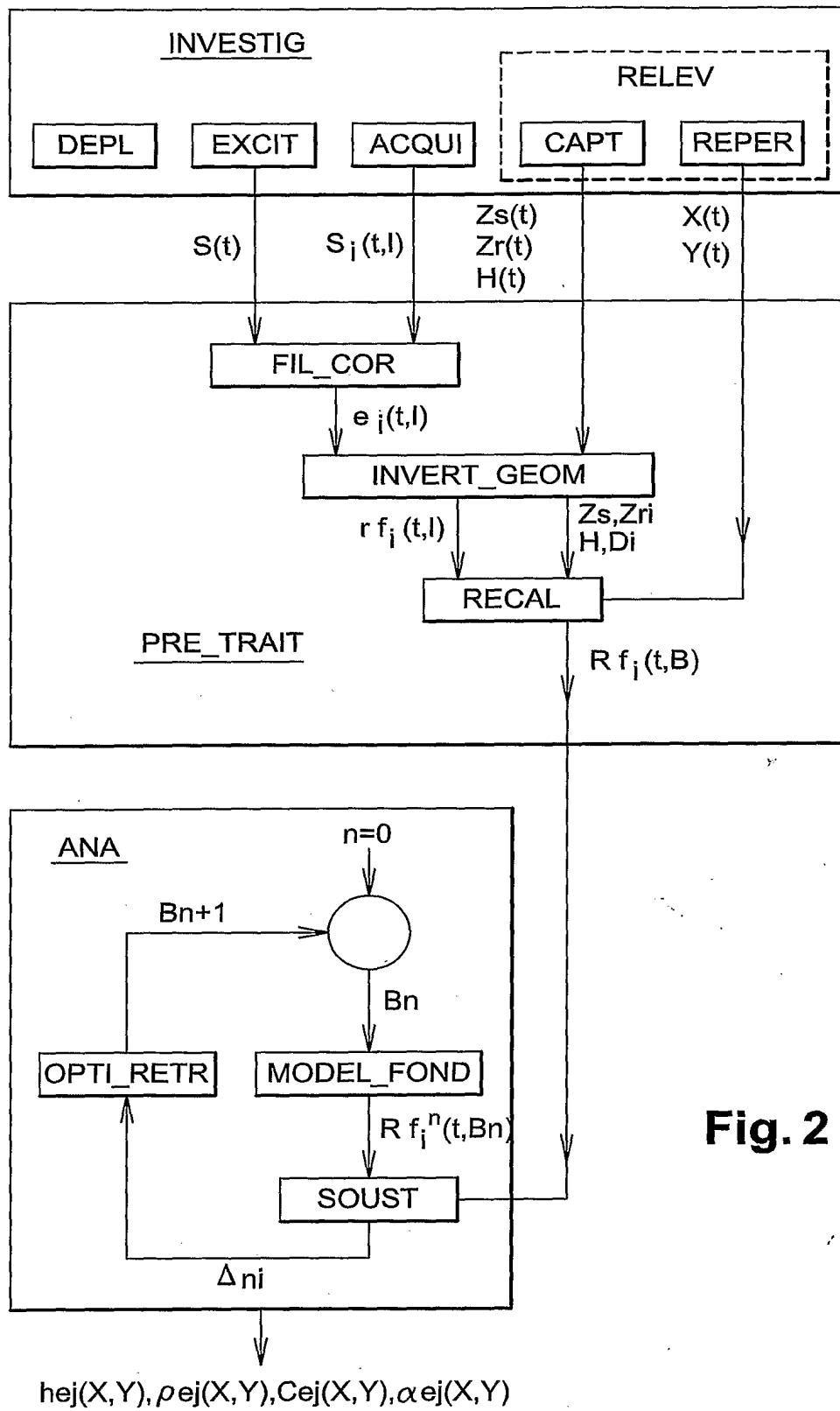
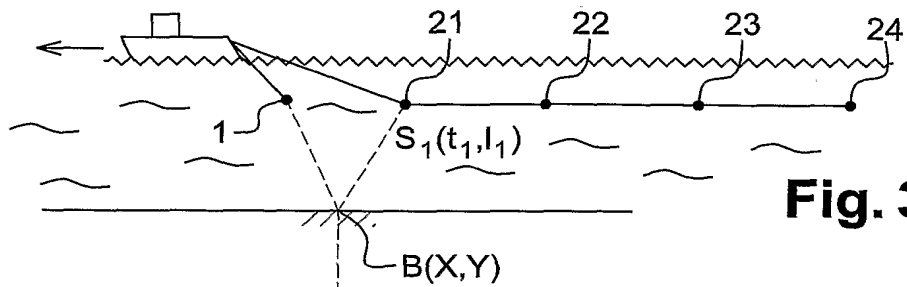
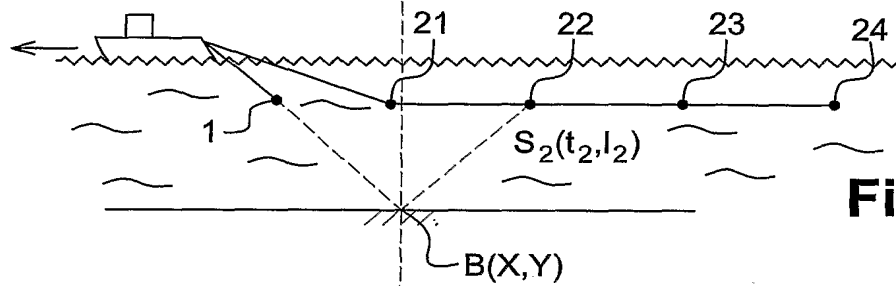
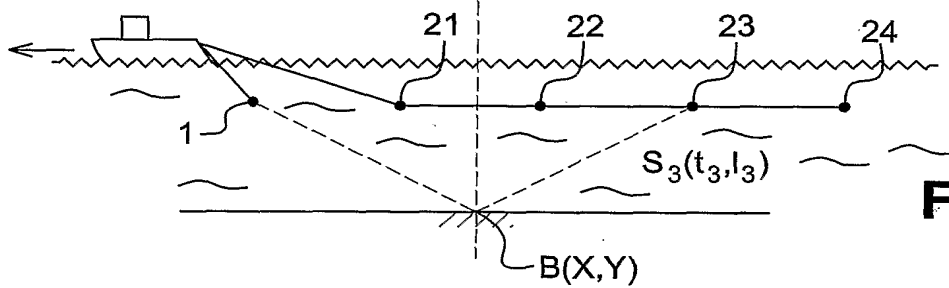
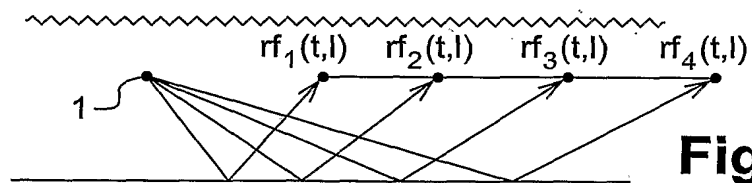
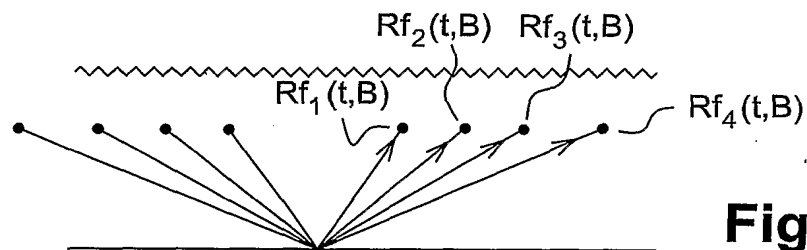


Fig. 2

3 / 6

**Fig. 3A****Fig. 3B****Fig. 3C****Fig. 4A****Fig. 4B**

4 / 6

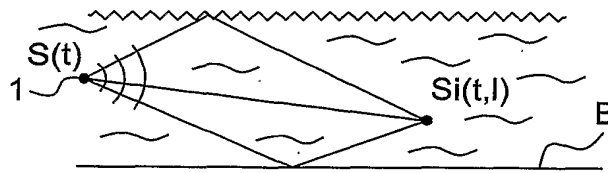


Fig. 5A

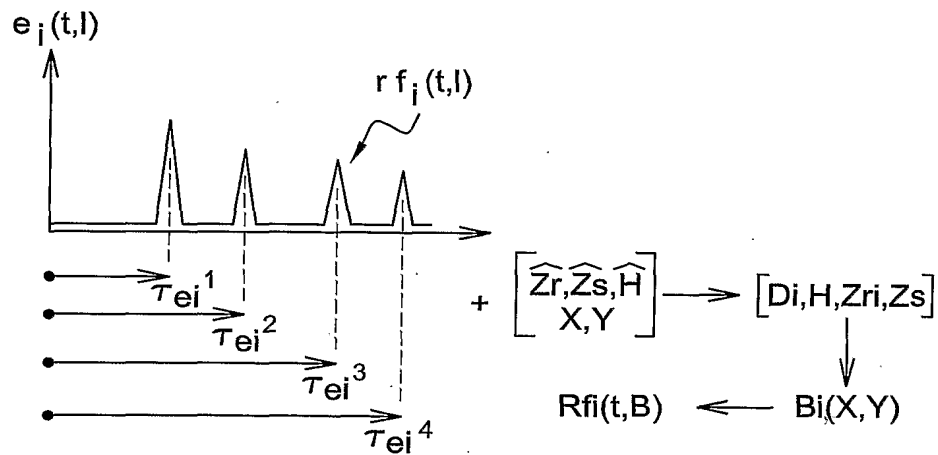


Fig. 5B

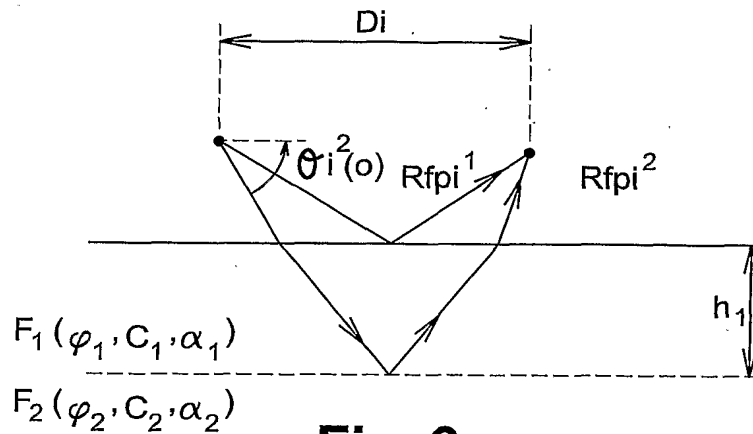
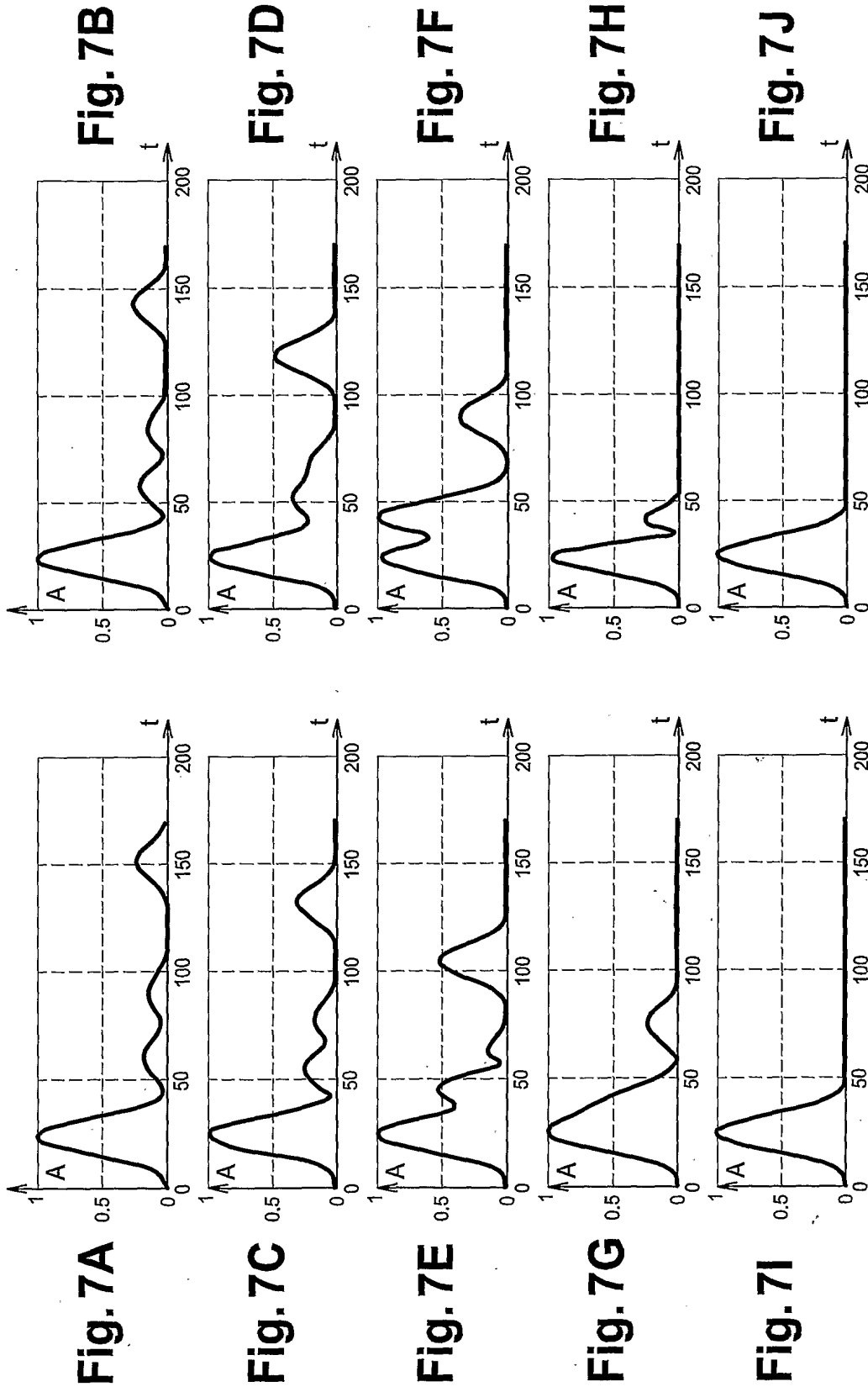
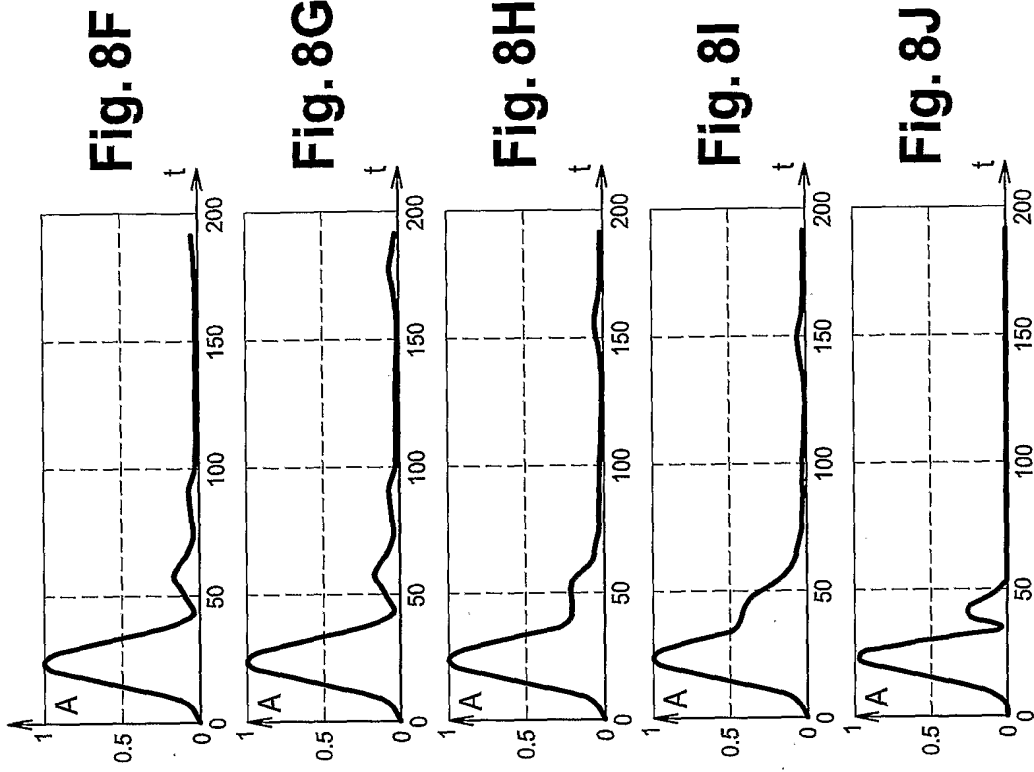
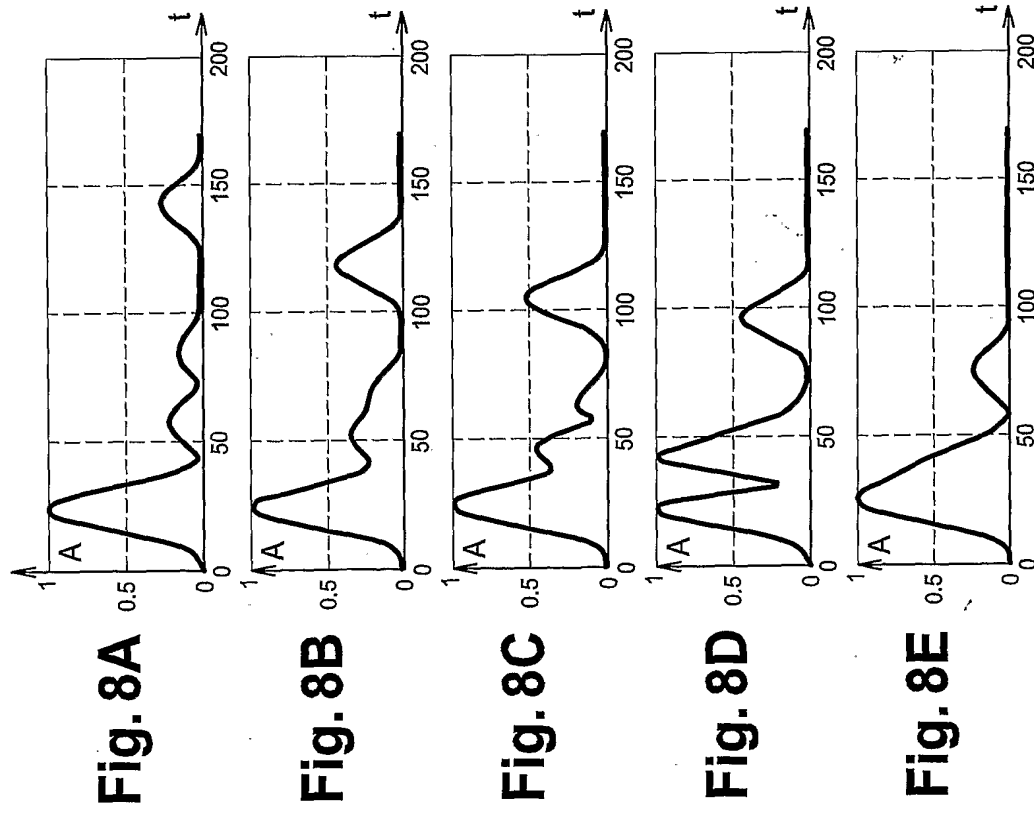


Fig. 6

5 / 6





INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR2005/000587

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G01V1/38

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 151 556 A (ALLEN KENNETH PAUL) 21 November 2000 (2000-11-21) cited in the application column 3, line 61 - column 4, line 20 column 6, line 13 - column 8, line 40 claim 1; figures 1,3	1-12
A	EP 0 215 703 A (INST FRANCAIS DU PETROL) 25 March 1987 (1987-03-25) cited in the application page 3, line 5 - page 5, line 15	1-12
A	WO 01/90782 A (VINJE VETLE ;NORSAR (NO)) 29 November 2001 (2001-11-29) page 6, line 5 - page 7, line 9 claim 1	1-12

-/--

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *&* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 July 2005

Date of mailing of the international search report

02/08/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Schneiderbauer, K

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR2005/000587

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>US 4 357 689 A (RUEHLE WILLIAM H) 2 November 1982 (1982-11-02) column 3, line 65 - column 5, line 41 -----</p>	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR2005/000587

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 6151556	A	21-11-2000	AU 772262 B2	22-04-2004
			AU 5743000 A	09-01-2001
			BR 0011773 A	02-04-2002
			CA 2375495 A1	28-12-2000
			EA 3760 B1	28-08-2003
			EP 1204885 A1	15-05-2002
			NO 20016144 A	19-02-2002
			WO 0079303 A1	28-12-2000
EP 0215703	A	25-03-1987	FR 2586820 A1	06-03-1987
			DE 3667333 D1	11-01-1990
			EP 0215703 A1	25-03-1987
			JP 5058514 B	26-08-1993
			JP 62098286 A	07-05-1987
			NO 863439 A ,B,	02-03-1987
			US 4796238 A	03-01-1989
WO 0190782	A	29-11-2001	NO 20002712 A	26-02-2002
			AU 5895401 A	03-12-2001
			CA 2410272 A1	29-11-2001
			EP 1301807 A1	16-04-2003
			WO 0190782 A1	29-11-2001
			US 2002010549 A1	24-01-2002
US 4357689	A	02-11-1982	US 4146870 A	27-03-1979
			AU 510036 B2	05-06-1980
			AU 2736077 A	01-02-1979
			BR 7704936 A	25-04-1978
			CA 1096963 A1	03-03-1981
			DE 2734091 A1	02-02-1978
			DK 338777 A	29-01-1978
			FR 2360087 A1	24-02-1978
			GB 1583042 A	21-01-1981
			JP 53019901 A	23-02-1978
			NL 7708214 A	31-01-1978
			NO 772567 A ,B,	31-01-1978
			NO 821289 A	31-01-1978
			NZ 184749 A	19-10-1981

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No
PCT/FR2005/000587

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE CIB 7 G01V1/38		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) CIB 7 G01V		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 6 151 556 A (ALLEN KENNETH PAUL) 21 novembre 2000 (2000-11-21) cité dans la demande colonne 3, ligne 61 - colonne 4, ligne 20 colonne 6, ligne 13 - colonne 8, ligne 40 revendication 1; figures 1,3 -----	1-12
A	EP 0 215 703 A (INST FRANCAIS DU PETROL) 25 mars 1987 (1987-03-25) cité dans la demande page 3, ligne 5 - page 5, ligne 15 -----	1-12
A	WO 01/90782 A (VINJE VETLE ;NORSAR (NO)) 29 novembre 2001 (2001-11-29) page 6, ligne 5 - page 7, ligne 9 revendication 1 ----- <div style="text-align: center;">-/--</div>	1-12
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe </div>		
° Catégories spéciales de documents cités:		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>*A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>*E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>*L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>*O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>*P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>*T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>*X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>*Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>*&* document qui fait partie de la même famille de brevets</p> </div> </div>		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée <div style="text-align: center; font-weight: bold;">14 juillet 2005</div>		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale <div style="text-align: center; font-weight: bold;">02/08/2005</div>
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé <div style="text-align: center; font-weight: bold;">Schneiderbauer, K</div>

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No
PCT/FR2005/000587

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>US 4 357 689 A (RUEHLE WILLIAM H) 2 novembre 1982 (1982-11-02) colonne 3, ligne 65 - colonne 5, ligne 41 -----</p>	1-12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No
PCT/FR2005/000587

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 6151556	A	21-11-2000	AU 772262 B2	22-04-2004
			AU 5743000 A	09-01-2001
			BR 0011773 A	02-04-2002
			CA 2375495 A1	28-12-2000
			EA 3760 B1	28-08-2003
			EP 1204885 A1	15-05-2002
			NO 20016144 A	19-02-2002
			WO 0079303 A1	28-12-2000
EP 0215703	A	25-03-1987	FR 2586820 A1	06-03-1987
			DE 3667333 D1	11-01-1990
			EP 0215703 A1	25-03-1987
			JP 5058514 B	26-08-1993
			JP 62098286 A	07-05-1987
			NO 863439 A ,B,	02-03-1987
			US 4796238 A	03-01-1989
WO 0190782	A	29-11-2001	NO 20002712 A	26-02-2002
			AU 5895401 A	03-12-2001
			CA 2410272 A1	29-11-2001
			EP 1301807 A1	16-04-2003
			WO 0190782 A1	29-11-2001
			US 2002010549 A1	24-01-2002
US 4357689	A	02-11-1982	US 4146870 A	27-03-1979
			AU 510036 B2	05-06-1980
			AU 2736077 A	01-02-1979
			BR 7704936 A	25-04-1978
			CA 1096963 A1	03-03-1981
			DE 2734091 A1	02-02-1978
			DK 338777 A	29-01-1978
			FR 2360087 A1	24-02-1978
			GB 1583042 A	21-01-1981
			JP 53019901 A	23-02-1978
			NL 7708214 A	31-01-1978
			NO 772567 A ,B,	31-01-1978
			NO 821289 A	31-01-1978
			NZ 184749 A	19-10-1981